

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Веретененко Светланы Викторовны на диссертацию в виде научного доклада Мироновой Ирины Александровны на тему: «Воздействие энергичных частиц на атмосферу Земли», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Проблема влияния солнечной активности и связанных с нею явлений на климат Земли приобрела особую актуальность в последние десятилетия, что связано с оживленной дискуссией о природе “глобального потепления” – повышения глобальной температуры, наблюдаемого в течение последних полутора столетий. Работы по исследованию солнечно-климатических связей были начаты на кафедре физики Земли под руководством проф. М.И. Пудовкина в 1990-х гг. Особое внимание уделялось эффектам вариаций солнечных и галактических космических лучей в различных характеристиках нижней атмосферы. Под руководством Мироновой И.А. исследования солнечно-атмосферных связей, начатые М.И. Пудовкиным, переведены на качественно новый уровень. В настоящее время они включают моделирование эффектов вариаций солнечных и галактических космических лучей в средней атмосфере, где имеет место максимальная ионизация за счет указанных частиц, а также эффектов высыпаний высокоэнергичных электронов, ранее на кафедре не изучавшихся.

Мироновой И.А. получен ряд новых интересных результатов, в том числе следующие:

- 1) Проведено моделирование распространения в атмосфере высокоэнергичных электронов (в диапазоне энергий от 30 кэВ до нескольких МэВ), высыпающихся из радиационного пояса. Отличительной особенностью модельных оценок скорости ионизации является учет вклада тормозного излучения, генерируемого высыпающимися электронами. Показано, что, благодаря тормозному излучению, увеличение скорости ионизации может иметь место в области высот 25-50 км. Скорость ионизации при высыпаниях магнитосферных электронов имеет, таким образом, два максимума: основной – на высотах 90-100 км (нижняя термосфера) и дополнительный – на высотах 30-40 км (верхняя стратосфера).
- 2) Исследована зависимость изменений химического состава полярной мезосферы (содержания соединений нечетного азота и нечетного водорода, а также озона) от интенсивности геомагнитных возмущений и времени года. Показано, что степень истощения озона линейно зависит от скорости ионизации, создаваемой высыпаниями высокоэнергичных электронов в ходе геомагнитных возмущений. Также выявлена сезонная зависимость изменений содержания озона: максимальный эффект высыпаний энергичных электронов (до 80% во время сильных геомагнитных возмущений) имеет место в зимний период. Впервые показано, что в летний период независимо от интенсивности геомагнитных возмущений изменений содержания озона не происходит.
- 3) Впервые сделаны оценки изменения химического состава полярной стратосферы во время Форбуш-понижений галактических космических лучей. Обнаружено, что в

зимней полярной стратосфере концентрация соединений нечетного водорода, разрушающего озон, может уменьшиться вдвое в связи с уменьшением скорости ионизации, при этом значимые изменения концентрации нечетного азота и озона отсутствуют. В летней полярной стратосфере эффекты Форбуш-понижений не обнаружены.

- 4) Проведены модельные исследования влияния солнечных вспышек класса X на химический состав стратосферы разных широтных областей. Обнаружено, что электромагнитное излучение данного класса вспышек может существенно влиять на концентрацию семейств нечетного азота в экваториальной области. В полярных широтах значимых изменений химического состава не обнаружено.

К работе можно сделать следующие замечания.

- 1) Не проводится сравнение результатов моделирования с наблюдательными данными, что не позволяет оценить их достоверность и качество моделирования.
- 2) Не делаются оценки изменений температуры и циркуляции в средней атмосфере, которые могут быть вызваны изменениями химического состава в связи с исследуемыми выпадениями энергичных частиц. Также следует пояснить, какое климатическое значение могут иметь обнаруженные изменения содержания озона, т.е., как эффекты энергичных частиц, имеющие место в средней атмосфере, могут влиять на состояние нижней атмосферы, погоду и климат.
- 3) Увеличение концентрации аэрозолей в средней атмосфере в связи с событиями GLE (Ground Level Enhancement) не является новым эффектом. Впервые оно было обнаружено Шумиловым и соавторами (Shumilov et al., *Annales Geophysicae*, 1996) в ходе GLE 16 февраля 1984 г., этот результат вошел в докторскую диссертацию Касаткиной Е.А. (ПГИ, 2015). Увеличение аэрозольной концентрации в ходе событий 15-20 января 2005 г. также отмечалось в работе (Веретененко и др., *Проблемы Арктики Антарктики*, 2008). Тем не менее, остается неясным вопрос, являются ли обнаруженные изменения концентрации аэрозолей результатом воздействия возросшей скорости ионизации или же возмущений циркуляции в ходе GLE. Результаты, полученные Мироновой И.А., обнаруживают ярко выраженную сезонную зависимость: увеличение концентрации выявлено только для 3-х событий GLE, имевших место в условиях полярной ночи в зимний период, когда в полярной стратосфере формируется циркумполярный вихрь, препятствующий воздухо- и теплообмену между полярными и средними широтами. Данные, приведенные в работах (Veretenenko, *Advances in Space Research*, 2021; *Geomagnetism and Aeronomy*, 2021 и др.), свидетельствуют о резком усилении циркумполярного вихря во время серии солнечных протонных событий 15-20 января 2005 г., а также во время ряда других событий. Таким образом, обнаруженное диссертанткой увеличение концентрации аэрозолей в связи с GLE не может однозначно подтвердить гипотезу о влиянии скорости ионизации на формирование аэрозолей. Необходимы дальнейшие исследования.

Указанные замечания не снижают научной значимости проведенных исследований и полученных результатов и могут быть учтены при дальнейшей работе. Основные результаты диссертации докладывались на многих российских и международных

конференциях и опубликованы в ведущих профильных журналах с высокими импакт-факторами, таких как Journal of Geophysical Research, Geophysical Research Letters, Space Science Reviews, Remote Sensing, Atmosphere, Frontiers in Earth Science, и др. За период 2002-2023 гг. диссертанткой опубликовано 47 работ.

Диссертация в виде научного доклада Мироновой Ирины Александровны на тему: «Воздействие энергичных частиц на атмосферу Земли» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Миронова Ирина Александровна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Член диссертационного совета

Доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

 Веретененко С.В.

07.12. 2023



Подпись  удостоверяю  
в отделе кадров ФТИ им.А.Ф.Иоффе

 | 